

Etude de l'effet de la structure sur le comportement mécanique et l'activité acoustique des tubes filamenteux fibre de verre E/vinylester à $\pm 55^\circ$ par des essais de traction sur anneaux : Split Disk Test

A. BEN KHALIFA ^a, M. ZIDI ^a, A. LAKSIMI ^b

a. Laboratoire de Génie Mécanique (LGM), Université de Monastir, MONASTIR, Tunisie,

b. Laboratoire Roberval UMR 625, Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, France

Résumé :

L'émission acoustique est l'une des techniques de contrôle non destructif les plus innovatrices qui permet de suivre en temps réel l'endommagement des matériaux composites.

Dans cette étude, l'influence de la variation de la structure (tubes avec deux couches : couche anticorrosion (AC) et couche mécanique (CM) et tubes avec CM seulement, avec variation de l'épaisseur de cette couche) sur le comportement mécanique et sur l'activité acoustique des tubes obtenus par enroulement filamentaire par des essais de traction sur anneaux (Split Disk Test SDT) a été étudiée. Des anneaux seront préparés et coupés à partir de ces tubes. Un dispositif a été conçu et réalisé spécialement pour cette étude. Les essais seront effectués en suivant les instructions de la norme ASTM-2290

Les résultats obtenus ont montré que le comportement mécanique ainsi que l'activité acoustique des tubes filamentaire changent pour chaque type de structure étudiée.

Mots clefs: Tubes filamenteux /type de structure / SDT / comportement mécanique / Activité acoustique

Abstract :

The acoustic emission is one of the most innovating techniques of non destructive testing which makes it possible to follow in real time the damage of composite materials.

In this study, the influence of the variation in the structure (pipes with two layers: layer anti corrosion (AC) and mechanical layer (CM) and tubes with CM only, with variation thickness of this layer) on the mechanical behavior and the acoustic activity of the filament wound pipe by the Split Disk Test (SDT) was studied.

The results obtained showed that the mechanical behavior as well as the acoustic activity of the tubes filament change for each type of studied structure.

Key words : Filament Wood Pipe /structure type /SDT /mechanical behaviour /Acoustic activity

1 Introduction

L'utilisation des matériaux composites à renfort fibreux et matrice organique est dans une phase ascendante dans l'industrie aéronautique, navale et automobile. Ces matériaux sont, particulièrement, adaptés aux structures qui requièrent une haute capacité d'absorption d'énergie, une haute résistance, une excellente rigidité en même temps qu'une grande légèreté. Pour cela, plusieurs études ont été menées pour caractériser ces matériaux composites et plus spécialement les tubes filamenteux.

Cevdet Kaynak et al [1] ont étudié l'effet de plusieurs paramètres tels que l'angle d'enroulement, le type de la résine ainsi que le type des fibres sur le comportement mécanique des tubes filamenteux en utilisant les essais de traction sur des anneaux. Les résultats obtenus ont montré que ces paramètres affectent considérablement la valeur de la contrainte circonférentielle. Le comportement mécanique des tubes filamenteux obtenu par enroulement filamentaire à $\pm 55^\circ$ à base des fibres de verre E et résine époxy soumis à différents types de chargement axial, chargement sous pression interne et chargement biaxial a été étudié par Bai et al [2]. Les résultats obtenus ont montré que les mécanismes d'initiation de l'endommagement sont

les microfissures au niveau de la matrice et le délaminage. Ces mécanismes se favorisent l'un sur l'autre selon l'augmentation du niveau de chargement. Martens et Ellyin [3] ont montré que les propriétés mécaniques les plus importantes des tubes filamenteux sont : la rigidité, la résistance à la rupture et la durée de vie lorsqu'ils ont étudié le comportement mécanique des tubes filamenteux multidirectionnelles fibres de verre E et résine époxy soumis à un chargement biaxial. Mertiny et al [4] ont étudié l'effet de l'angle d'enroulement sur le comportement mécanique des tubes filamenteux sous chargement axial et ils ont montré que l'angle d'enroulement joue un rôle primordial sur leur résistance mécanique. Huguet [5], Nechad [6] et Godin et al [7] ont étudié la signature acoustique des plaques unidirectionnelles de fibres de verre et résine polymère sous chargement axial et ils ont réussi à identifier pour chaque mode d'endommagement sa propre signature acoustique. Ben Khalifa et al [8] ont étudié l'activité et la signature acoustique des tubes filamenteux sous chargement axial. Les résultats obtenus ont montrés que le comportement mécanique de ces tubes est divisé en quatre zones : une première zone dite zone de comportement élastique, une deuxième zone dite zone de rupture transverse à travers la matrice, une zone de rupture de la matrice comme troisième zone et finalement une dernière zone dite zone de rupture finale. Ces résultats ont conduit à conclure que l'activité ainsi que la signature acoustique changent d'une zone à une autre selon le mode de chargement.

Dans notre étude, l'effet de la structure des tubes obtenus par enroulement filamenteux de fibres de verre E/résine vinylester à $\pm 55^\circ$ sur le comportement mécanique ainsi que l'activité acoustique par des essais de traction sur anneaux (Split Disk Test) est étudié. Ces essais ont été effectués en suivant les instructions de la norme ASTM D-2290.

2 Protocole expérimental

2.1 Matériau de l'étude

Les anneaux sont obtenus à partir des tubes fournis par la société CTRA-TUNISIE sise à Hergla. Les tubes sont constitués de deux couches (figure 1-a). La première couche nommée « couche de résistance mécanique » (RM) sert à supporter les efforts mécaniques et elle est obtenue par le procédé d'enroulement hélicoïdal continu des mèches de fibres de type E (dans notre étude deux épaisseurs de cette couche sont utilisées : 2.5 et 5 mm). La deuxième sert à protéger la couche supérieure de la corrosion. Cette couche est appelée « couche anticorrosion » (AC) (une seule épaisseur de 2.5 mm est prise en compte durant cette étude). Elle est constituée essentiellement des couches successives de mat de verre de type E. La forme et les caractéristiques des anneaux obtenus sont données par la figure 1 (b). L'anneau présente deux zones réduites situées à 180° l'un de l'autre. Ces zones seront placées entre les demis-disques supérieur et inférieur du dispositif comme le montre la figure 2 (b).

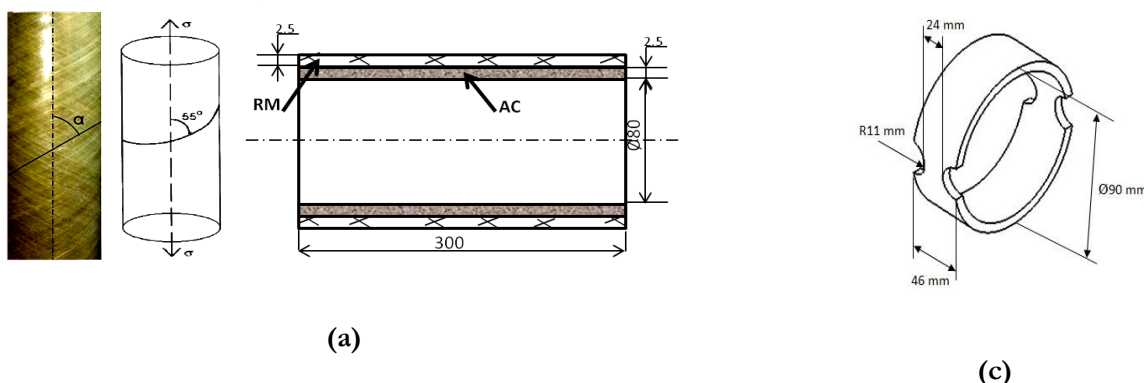


FIG. 1 : (a) Caractéristiques géométriques du tube; (b) Caractéristiques géométriques de l'anneau

2.2 Essai de traction

L'essai de traction sur anneaux (SDT) est effectué selon les instructions de la norme ASTM D2290 [9]. Un dispositif expérimental a été conçu et fabriqué spécialement pour assurer cet essai figure 2 (a). L'essai est réalisé sur la machine de traction SHIMADZU UH-F30A. La figure 3-a présente le montage du dispositif sur cette machine. La mesure de la déformation a été établie à partir de la cellule de déplacement de la machine de traction. Un essai de perte au feu a été réalisé selon la norme NF T57-518 [10] afin de déterminer le taux de

fibres dans les tubes à partir desquels on découpe les anneaux. Un taux de fibres de $60\pm 2\%$ est trouvé pour ces tubes.

2.3 Emission acoustique :

Le contrôle non destructif par émission acoustique (EA) consiste à détecter des ondes générées par le matériau au cours de l'essai de traction sur anneaux pour en extraire des informations en temps réel sur son comportement.

Le suivi des essais de traction par émission acoustique a été réalisé avec la chaîne d'acquisition PCI-2 (Peripheral Component Interconnect) (figure 2-c) produite par la société Physical Acoustic Corporation. Deux capteurs piézoélectriques (résonant, avec gamme de résonance maximale de 500MHz) sont placés sur l'anneau (figure 2-b), le premier, C1, est placé à droite et le deuxième, C2, à gauche du dispositif. Le seuil utilisé durant cette étude est de 45 dB.

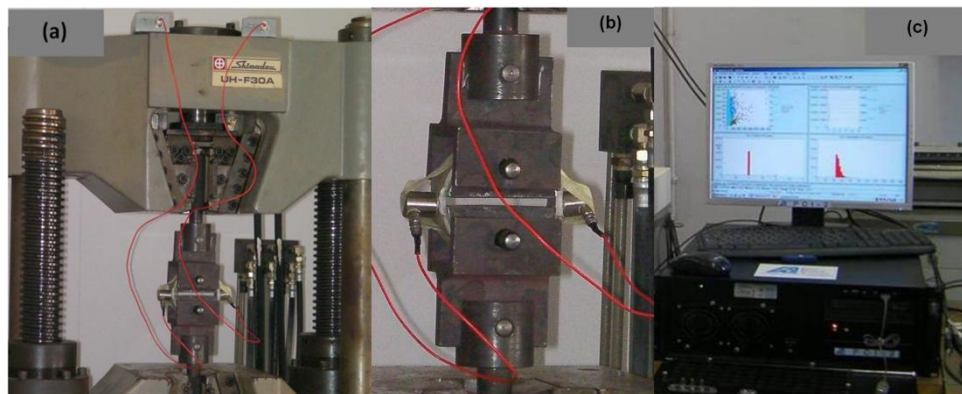


FIG 2 : (a) Montage du dispositif du Split disk Test sur la machine de traction ; (b) position des capteurs sur les deux zones réduites ; (c) Chaîne d'acquisition de l'EA

3 Résultats et discussions

3.1 Essai de traction sur anneaux

Une série d'essais a été effectuée dans le but d'étudier l'effet de la structure sur le comportement mécanique des tubes filamenteux d'une part et de déterminer leurs caractéristiques mécaniques circonférentielles d'autre part. Le résultat obtenu suite à ces essais de traction est résumé par l'évolution de la courbe contrainte circonférentielle/déformation circonférentielle pour trois anneaux comportant les trois types de structures. Le premier avec les deux couches RM+AC, les deux autres sont sans couches AC avec deux épaisseurs différentes : 2.5 et 5 mm. Ces courbes sont représentées par la figure 3.

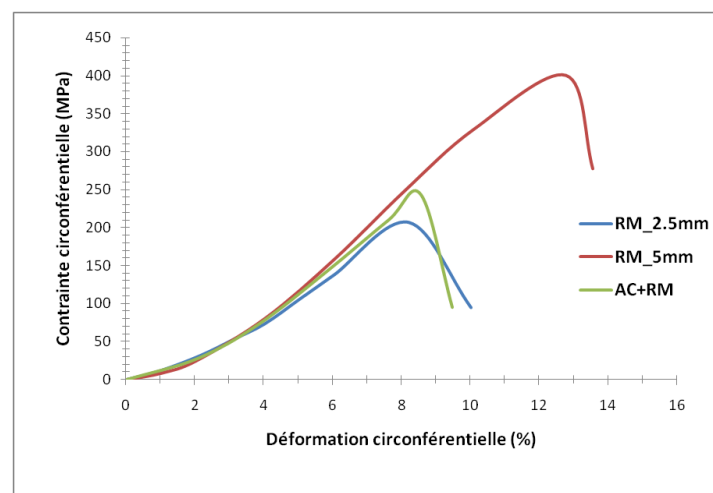


FIG 3 : Evolution de la contrainte circonférentielle en fonction de la déformation circonférentielle pour chaque type de structure.

On peut conclure que la couche anticorrosion a de l'influence sur le comportement mécanique des tubes puisqu'elle améliore les caractéristiques mécaniques des tubes filamenteux. On remarque aussi que l'épaisseur joue un rôle essentiel dans la résistance mécanique des anneaux et par la suite dans des tubes.

3.2 Suivi de l'activité acoustique suite à un essai de traction sur anneaux

Le suivi par émission acoustique est assuré par une analyse en cumul. Cette analyse représente l'évolution de la contrainte circonférentielle et l'un des paramètres de l'émission acoustique en fonction de la déformation circonférentielle. Dans notre cas, on va s'intéresser au suivi de l'activité acoustique par l'étude de l'évolution de la contrainte circonférentielle, et le nombre de coups cumulés en fonction de la déformation circonférentielle. De ce fait, une analyse statistique a été réalisée pour identifier le capteur le plus représentatif. L'analyse statistique consiste à mettre en valeur l'un des paramètres du signal de l'émission acoustique qui est le nombre des événements au cours de l'essai de traction sur anneau en fonction de la distribution par gamme d'amplitude et par capteur. La figure 4 représente l'évolution des événements en fonction de la distribution par gamme d'amplitude et par capteur. On constate bien que le capteur C2 est le plus représentatif que le capteur C1. Ceci s'explique par sa position sur la zone réduite la plus endommagée et par la suite celle qui va se rompre en premier. De ce fait il enregistre le nombre maximal des événements au cours de l'essai. Du coup, ce capteur sera pris en compte pour l'analyse en cumul. Le tableau 1 met en évidence ces résultats. Dans la suite, le capteur C2 sera pris en compte pour l'analyse en cumul

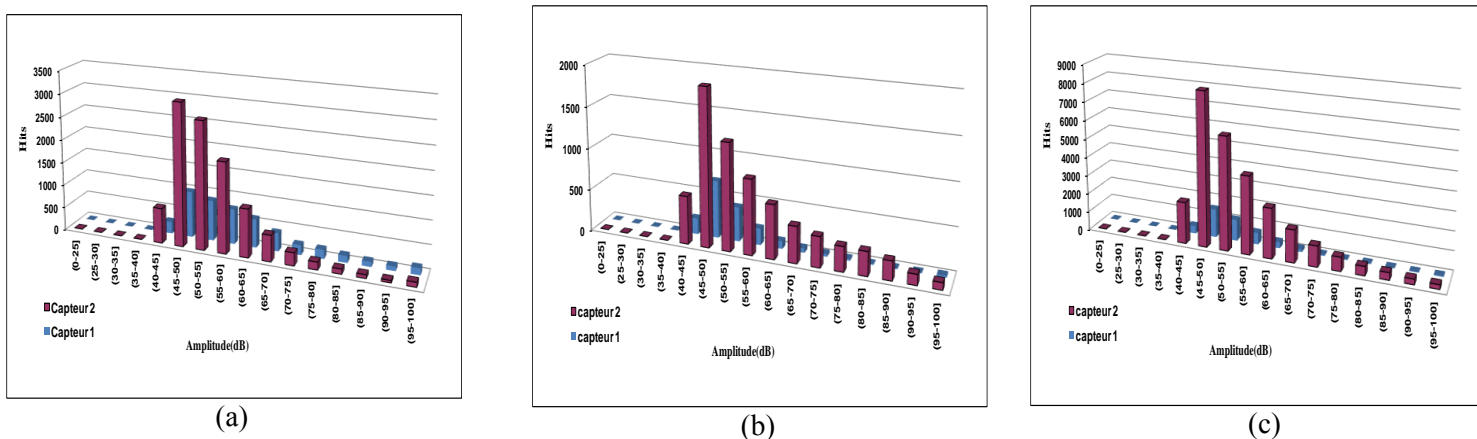


FIG. 4 : Evolution du nombre d'alternances en fonction de la distribution par gamme d'amplitude et par capteur pour : (a) AC à 2.5mm & RM à 2.5mm ; (b) RM à 2.5mm ; (c) RM à 5mm

Tableau 1 : Nombre total d'alternances relatif à chaque type de structure

Tubes		RM 2.5mm	RM 5mm	AC+RM
Hits	C1	1733	4393	4414
	C2	7030	28137	8682

La gamme d'amplitude la plus représentative des modes d'endommagement des tubes filamenteux est donnée par cette étude statistique. Cette gamme d'amplitude est comprise entre 45 et 90dB, du coup elle couvre toute la gamme d'amplitude de l'endommagement inter-facial, matriciel ainsi que la rupture des fibres des matériaux composites [4].

Dans la suite, on représente l'effet du changement du type de structure et de l'épaisseur de la couche mécanique sur l'évolution de la contrainte circonférentielle et le nombre de coups cumulés en fonction de la déformation circonférentielle. Cette évolution est représentée par la figure 5.

Au premier lieu, on étudiera l'effet de la couche anticorrosion sur l'activité acoustique. Pour cela, une comparaison entre les trois zones de la courbe représentée par la figure 5-a et la courbe de la figure 5-b est

effectuée. Pour la première zone, on observe que pour les deux cas l'activité acoustique est faible ou quasi absente. Cette zone est délimitée par la deuxième zone qui débute à 6.1% de déformation pour un anneau constitué par les deux couches AC+RM et elle débute à 5.2% de déformation circonférentielle pour l'anneau constitué par une couche mécanique RM de 2.5 mm d'épaisseur. Cette deuxième zone est caractérisée par une activité acoustique intense jusqu'à la rupture pour la première structure tandis que pour la deuxième structure l'activité acoustique est peu intense. A la rupture des anneaux commence la troisième zone pour les deux cas. A cette zone, l'activité acoustique est peu intense pour le premier anneau et presque absente pour le deuxième. Ceci est dû essentiellement à l'effet de la couche anticorrosion qui améliore la contrainte à la rupture vue la présence de fibres courtes disposées aléatoirement dans cette couche ce qui donne plus d'enregistrement au niveau de l'émission acoustique lorsqu'il y a rupture des fibres.

La comparaison entre l'évolution de l'activité acoustique représentée par la figure 5-c et la figure 5-b met en valeur l'effet de l'épaisseur de la couche mécanique sur l'activité acoustique suite à un essai de traction sur anneaux. On observe d'après ces deux courbes et pour la première zone que l'activité est faible. Cette zone se délimite pour la valeur de 6.8 % de déformation pour la première courbe tandis qu'elle est délimitée de 5.2% pour la première. A ce niveau commence la deuxième zone. Cette zone est caractérisée par une activité intense pour les anneaux ayant une épaisseur de 5 mm de couche mécanique RM que celui ayant 2.5 mm d'épaisseur de RM. Ceci est dû essentiellement au nombre de couches de fibres de verre utilisées lors de la production des tubes.

Le tableau 2 met en valeur la corrélation entre les paramètres de l'émission acoustique et les caractéristiques mécaniques obtenues lors d'un chargement radial. Ce tableau montre que la variation de la résine affectera non seulement les caractéristiques mécaniques des tubes filamenteux mais aussi elle affecte les paramètres de l'émission acoustique tels que l'amplitude et le nombre des coups...

Tableau 2 : Corrélation entre les paramètres mécaniques et les paramètres de l'émission acoustique pour chaque variation de structure

Tubes avec résine		AC+RM	RM 2.5mm	RM 5mm
Caractéristiques mécaniques	Contrainte à la rupture (MPa)	242 (±5)	206 (±6)	400 (±8)
	Déformation à la rupture (%)	8 (±0.5)	8 (±0.26)	12 (±0.7)
Nombre de coups cumulés		641	733	1034
Amplitude (dB)		77	73	71

On peut constater d'après ce tableau que la principale source d'endommagement à la rupture est celle de la rupture des fibres et par la suite de la rupture matricielle puisqu'on enregistre une gamme d'amplitude variant entre 70 et 80 dB [5], [6] et [7].

4 Conclusions

L'effet de variation de la structure sur le comportement mécanique ainsi que l'activité acoustique des tubes filamenteux $\pm 55^\circ$ fibre de verre E/vinylester par des essais de traction sur anneaux ont été étudiés.

On a conclu que la structure a de l'effet sur le comportement mécanique. Cet effet se traduit par l'effet de la présence de la couche anticorrosion des tubes puisqu'elle améliore les caractéristiques mécaniques des tubes filamenteux d'une part. D'autre part par l'effet de la variation de l'épaisseur qui joue un rôle essentiel dans la résistance mécanique des anneaux et par la suite dans des tubes.

On a montré aussi que la structure a de l'effet sur le l'activité acoustique. Cette activité est faible pour le comportement élastique du matériau pour chaque type de structure. Cette activité s'amplifie progressivement en se rapprochant de la zone de rupture du matériau. On a conclu que le mode d'endommagement dominant est la rupture matricielle ainsi que les ruptures des fibres.

D'après ces conclusions, on se permet de dire que la structure joue un rôle sur le comportement mécanique des matériaux composites filamenteux et que la technique du suivi par émission acoustique est prometteuse pour le suivi de l'endommagement des tubes filamenteux par des essais de traction sur anneaux.

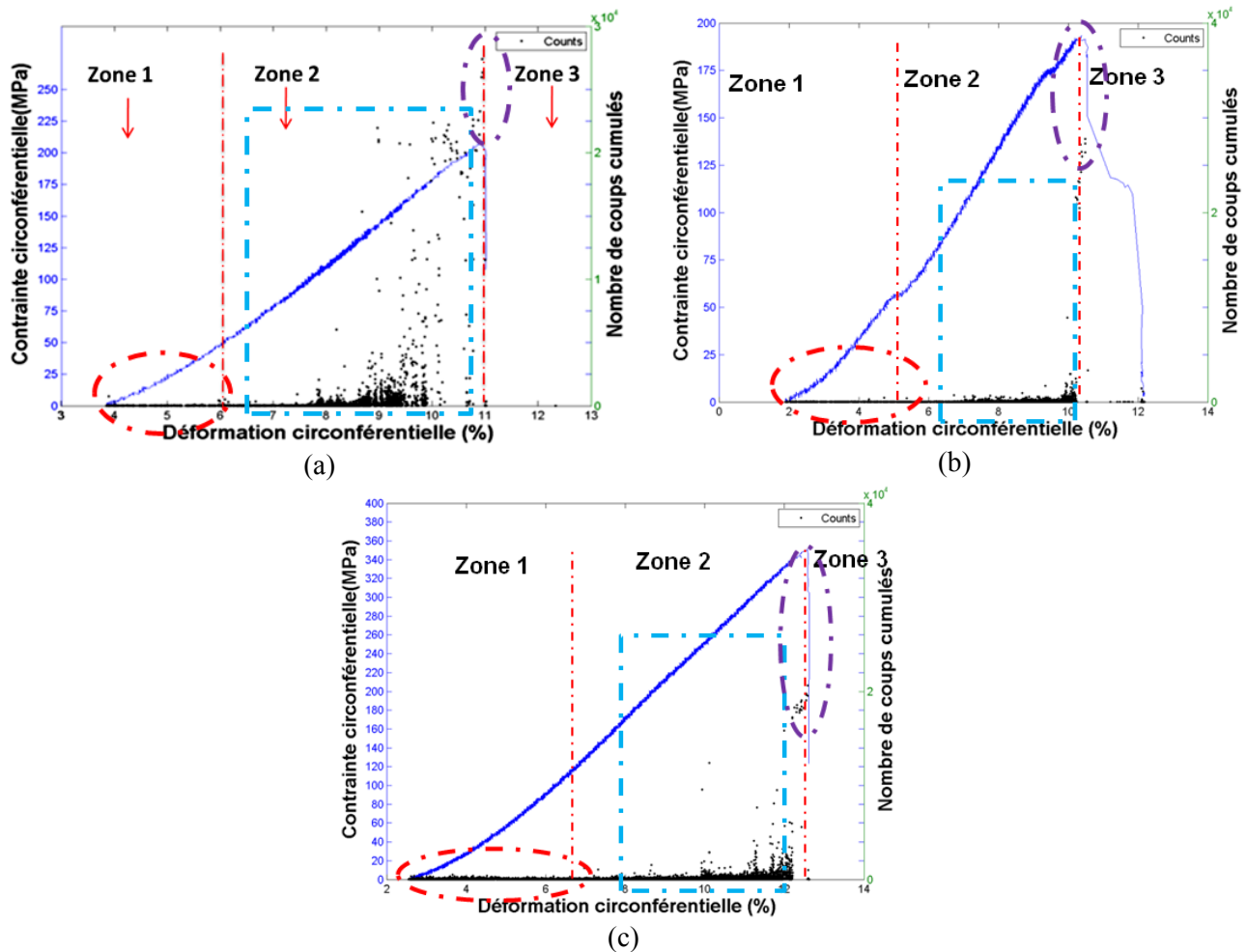


FIG.5 : Effet de la structure sur l'évolution de l'activité acoustique suite à un essai de traction sur anneau (a) AC+AM ; (b) RM avec une épaisseur de 2.5 mm mm (c) RM avec une épaisseur de 5

Références :

- [1] KAYNAK Cevdet, ERDILLER E. Salim, PARNAS Levend, SENEL Fikret, Use of split-disk tests for the process parameters of filament wound epoxy composite tubes . Polymer Testing ,2005, vol. 24, pp. 648–655.
- [2] BAI J., SEELEUTHNER Phillipe, BOMPARD Phillipe, Mechanical behaviour of $\pm 55^\circ$ filament-wound glass-fibre/epoxy-resin tubes: i.: microstructural analyses, mechanical behaviour and damage mechanisms of composite tubes under pure tensile loading, pure internal pressure, and combined loading, Composites science and technology, 1997, vol 51, pp. 141-153.
- [3] MARTENS M, ELLYIN F. Biaxial monotonic behavior of a multidirectional glass fiber epoxy pipe. Composite: Part A 2000; vol 31, pp.1001–14.
- [4] MERTINY P, ELLYIN F, HOTHAN A. An experimental investigation on the effect of multi angle filament winding on the strength of tubular composite structures. Compos Sci Technol 2004; vol 64(1):1.
- [5] HUGUET S, GODIN N, GAERTNER R, SALMON L, VILLARD D. Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester. Compost Sci Technol 2002; vol 62, pp. 1433–44.
- [6] NECHAD H. Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restant, Thèse à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2004
- [7] GODIN N, HUGUET S., GAERTNER R., SALMON L. ; Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectional glass/polyester composite using supervised and unsupervised classifiers. NDT&E International, 2004, vol 37, pp. 253–264
- [8] BEN KKALIFA A., ZIDI M, LAKSSIMI A., Mechanical characterization of glass/vinylester $\pm 55^\circ$ filaments wound pipes by acoustic emission under axial monotonic loading. Comptes rendues mécaniques, 2012.
- [9] D-2290-00, Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe by Split Disk Method”, American Society for Testing Materials (ASTM) designation: D2290-00, 2003
- [10] NF T57-518. Plastique renforcé au verre textile, Préimprégnés, Teneur en verre et en charge-Méthode par calcination Normalisation française, Octobre 1987.